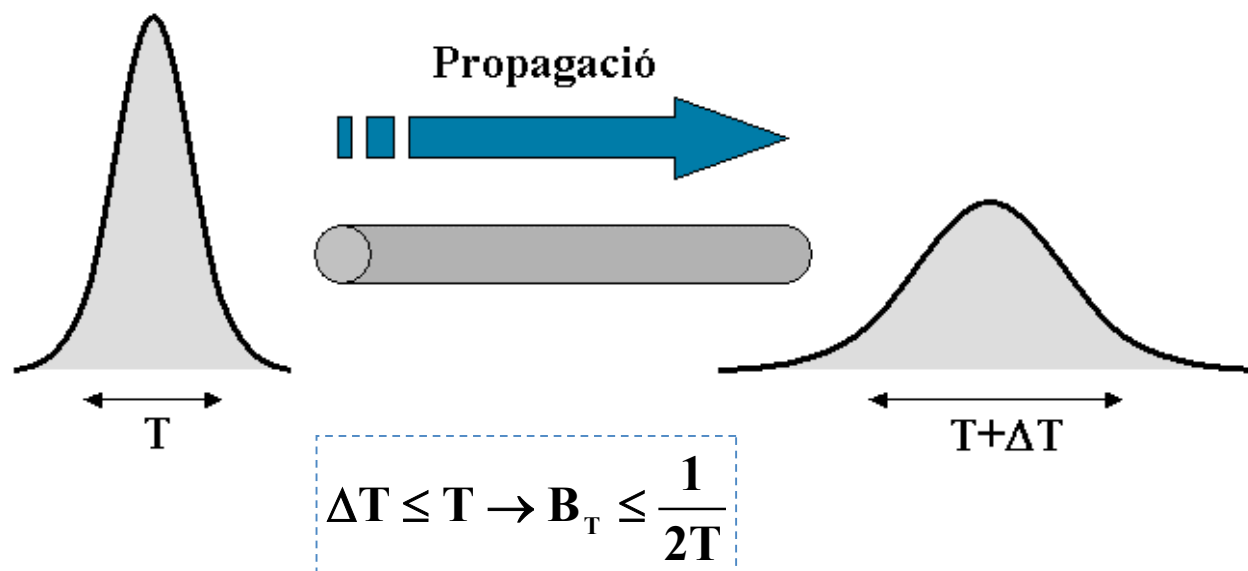


DISPERSIÓ EN F.O.

Definició

“Quan un pols curt de llum es propaga a través d’una fibra òptica, la seva energia tendeix a separar-se en el temps donant lloc a un eixamplament del mateix envers un interval temporal major”



Estimació conservadora

Dispersió intermodal

Cada mode es propaga a una velocitat diferent donant lloc a un retard d'uns respecte els altres. Només es dona en fibres multimode.

Dispersió intramodal

Dispersió cromàtica (GVD)

La velocitat de propagació depèn de la longitud d'ona, cada component espectral experimenta un retard diferent. És negligible enfront la dispersió intermodal.

Dispersió del material

La dependència freqüencial de l'índex de refracció dona lloc a diferents velocitats de propagació.

Dispersió guia-ona

La distribució espacial de la llum depèn de la longitud d'ona i en conseqüència la velocitat de propagació. És negligible enfront la dispersió del material.

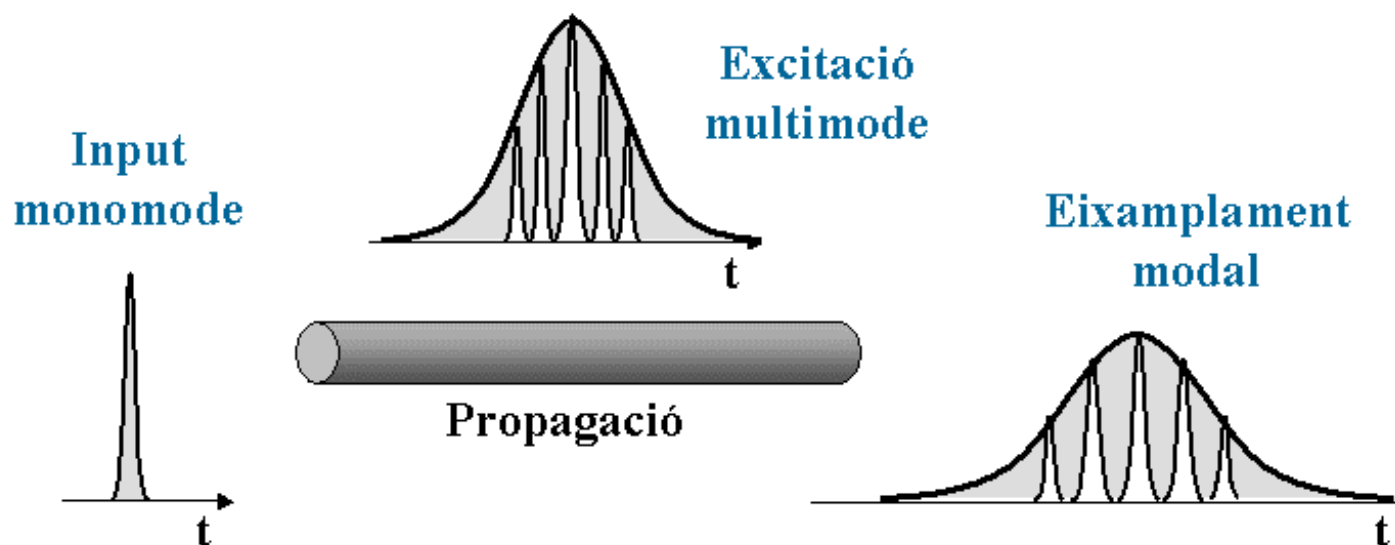
Dispersió de polarització (PMD)

L'índex de refracció depèn de l'angle ϕ , per tant cada eix de l'estat de polarització es propaga a una velocitat diferent. És negligible enfront la dispersió cromàtica.

DISPERSIÓ EN FIBRES MULTIMODE

Dispersió intermodal

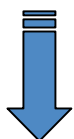
La dispersió modal es dona en fibres multimode com a resultat de les diferents velocitats de grup corresponents a cada mode de propagació. Els modes no són excitats per igual donant lloc a un perfil determinat.



Diferència de camins

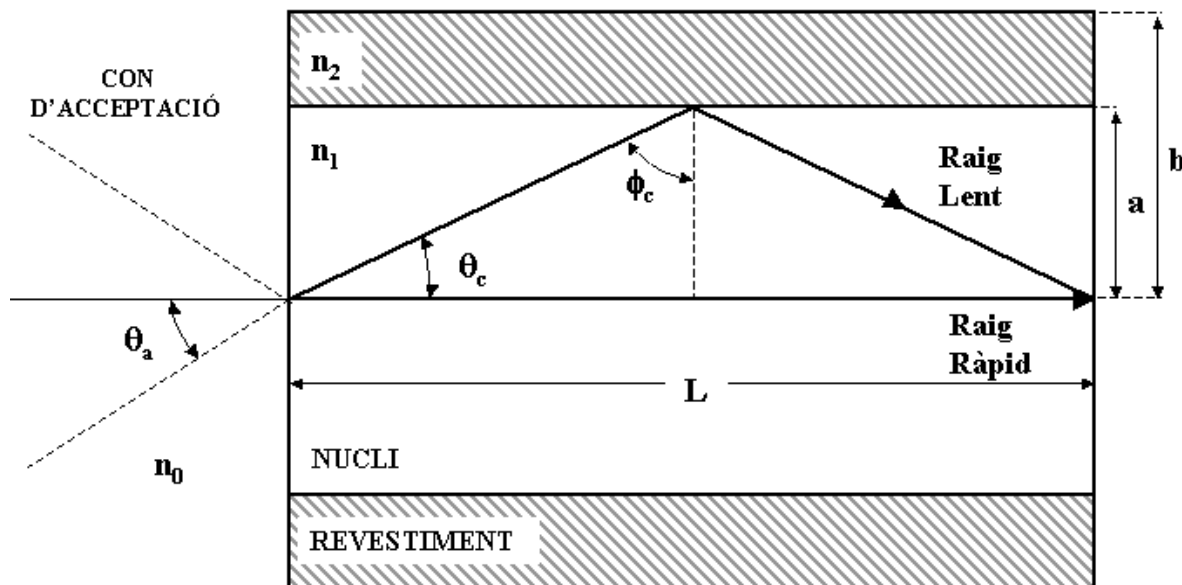
$$t_{\min} = \frac{L}{c} \quad t_{\max} = \frac{L}{c} \frac{\sin \phi_c}{n_1}$$

$$n_{\text{eff}} = n_1 \cdot \sin \phi$$



$$\tau_{\text{inter}} \equiv \frac{t_{\max} - t_{\min}}{L} =$$

$$= \frac{n_1}{c} \frac{n_1 - n_2}{n_2} \approx \frac{n_1}{c} \Delta \approx \frac{1}{2n_1 c} \text{NA}^2 \quad \text{Unitats: [ns/km]}$$



Fibres SI

$$\tau_{\text{inter}} \approx \frac{n_1 \Delta}{c}$$

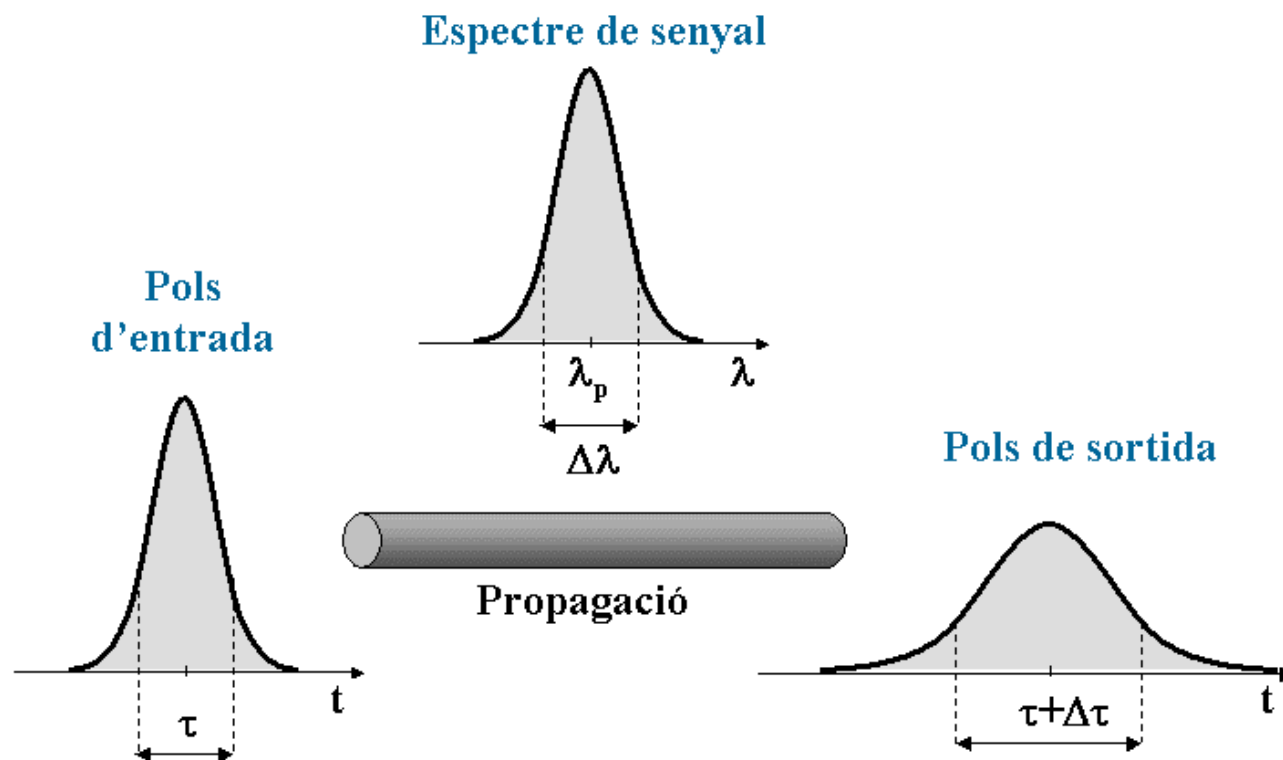
Fibres GRIN

$$\tau_{\text{inter}} \approx \frac{n_1 \Delta^2}{8c}$$

DISPERSIÓ EN FIBRES MONOMODE

Dispersió cromàtica (GVD)

L'origen d'aquest tipus de fenomen prové de la dependència freqüencial de l'índex de refracció n , per tant, de la velocitat de grup.



Retard de grup [s/m]

$$\tau_g \equiv \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{\mathbf{n}}{c} + \frac{\omega}{c} \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \omega} = \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} = \frac{\mathbf{n}}{c} - \frac{\lambda}{c} \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \lambda}$$

$$\beta \equiv \mathbf{n} \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi \mathbf{n}}{\lambda} \rightarrow \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} = -\frac{2\pi \mathbf{n}}{\lambda^2} + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \lambda}, \quad \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} = -\frac{2\pi c}{\omega^2} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c}$$

β : constant de propagació

Velocitat de grup [m/s]

$$\mathbf{v}_g \equiv \frac{1}{\tau_g} = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)^{-1} = \frac{c}{\mathbf{n} + \omega \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \omega}} = \frac{c}{\mathbf{n} - \lambda \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \lambda}} = \frac{c}{\mathbf{n}_g}$$

Índex de grup

$$\mathbf{n}_g \equiv \mathbf{n} + \omega \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \omega}$$

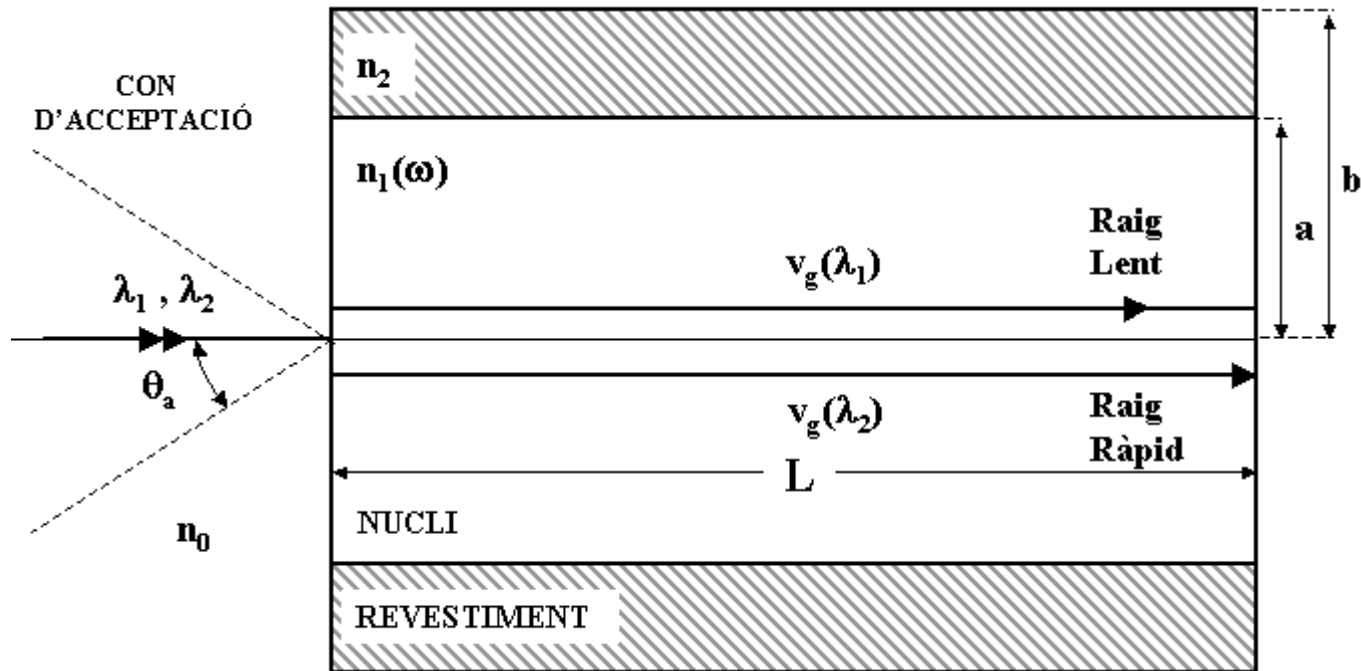
Velocitat de fase

$$\mathbf{v}_f \equiv \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\mathbf{n}} \xrightarrow{\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \lambda} = 0} \mathbf{v}_f = \mathbf{v}_g$$

$\mathbf{n} \rightarrow \bar{\mathbf{n}}$

DISPERSIÓ DEL MATERIAL

Cada component freqüencial experimenta un retard diferent degut a que es propaguen a diferents velocitats de grup.



DISPERSIÓ DEL MATERIAL

Eixamplament

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial \omega} \Delta \omega = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta \omega = L \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \Delta \omega = L \beta_2 \Delta \omega$$

$$\beta_2 \equiv \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \quad \text{Coeficient de dispersió}$$

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial \lambda} \Delta \lambda = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta \lambda = L D_M \Delta \lambda$$

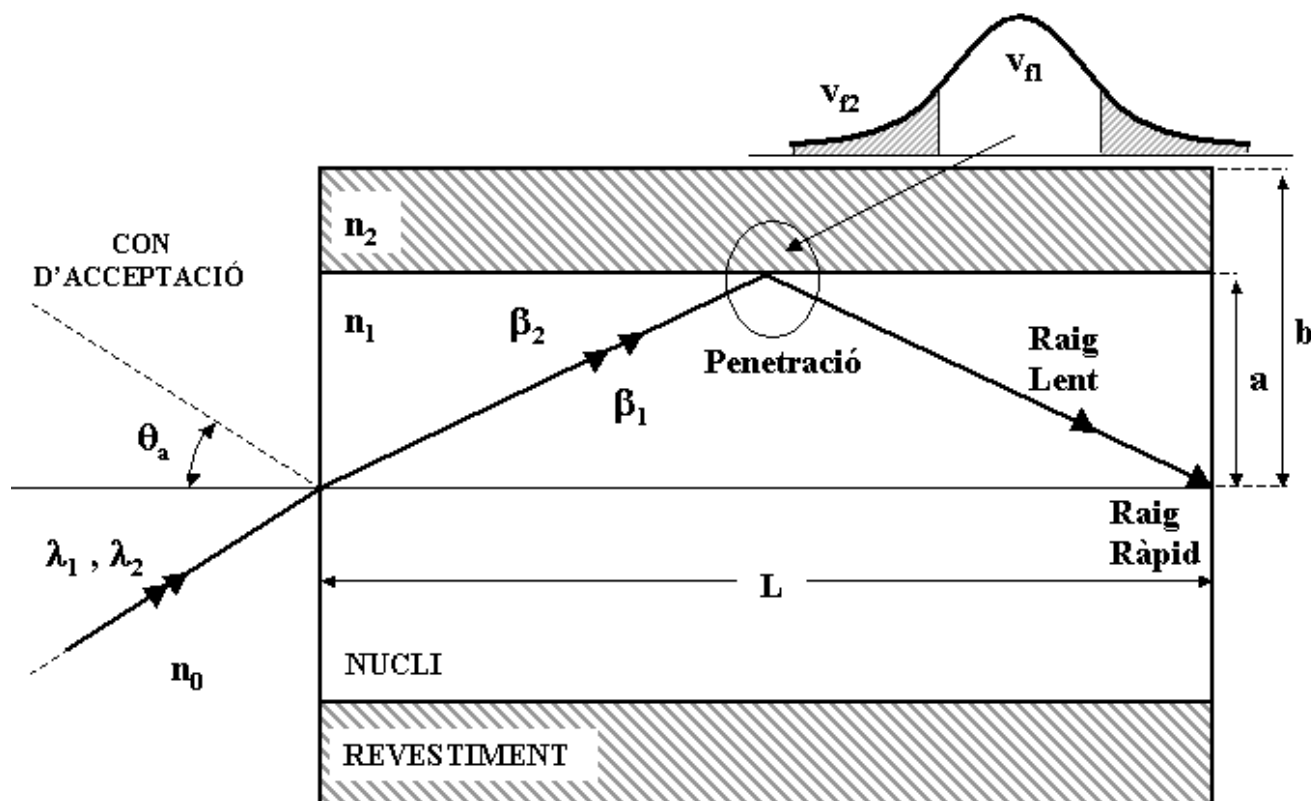
$$D_M \equiv \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$$

Paràmetre de dispersió

Unitats: [ps/(nm·km)]

DISPERSIÓ GUIA-ONA

La velocitat de grup dels modes depèn de la longitud d'ona, encara que la dispersió del material sigui negligible, donat que d'ella en depèn el percentatge de penetració en el revestiment.



DISPERSIÓ DEL MATERIAL I GUIA-ONA COMBINADES

$$\mathbf{D}_{\text{intra}} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{v}_g} \right) = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \left(2 \frac{\partial \bar{\mathbf{n}}}{\partial \omega} + \omega \frac{\partial^2 \bar{\mathbf{n}}}{\partial \omega^2} \right) = \mathbf{D}_M + \mathbf{D}_W$$

$$\mathbf{b} \equiv \frac{\bar{\mathbf{n}} - \mathbf{n}_2}{\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2}$$

$$\bar{\mathbf{n}} = \mathbf{n}_2 + \mathbf{b}(\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2) \approx \mathbf{n}_2(1 + \mathbf{b}\Delta)$$

$$|\mathbf{D}_{\text{intra}}| \cdot \Delta\lambda \equiv \tau_{\text{intra}} \geq 0 \quad [\text{s/m}]$$

$$\mathbf{D}_W = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2} \left[\frac{\mathbf{n}_{2g}^2}{\mathbf{n}_2\omega} \mathbf{V} \frac{\partial^2(\mathbf{Vb})}{\partial \mathbf{V}^2} + \frac{\partial \mathbf{n}_{2g}}{\partial \omega} \frac{\partial(\mathbf{Vb})}{\partial \mathbf{V}} \right]$$

$$\mathbf{D}_M = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \frac{\partial \mathbf{n}_{2g}}{\partial \omega} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{n}_{2g}}{\partial \lambda}$$

empíricament

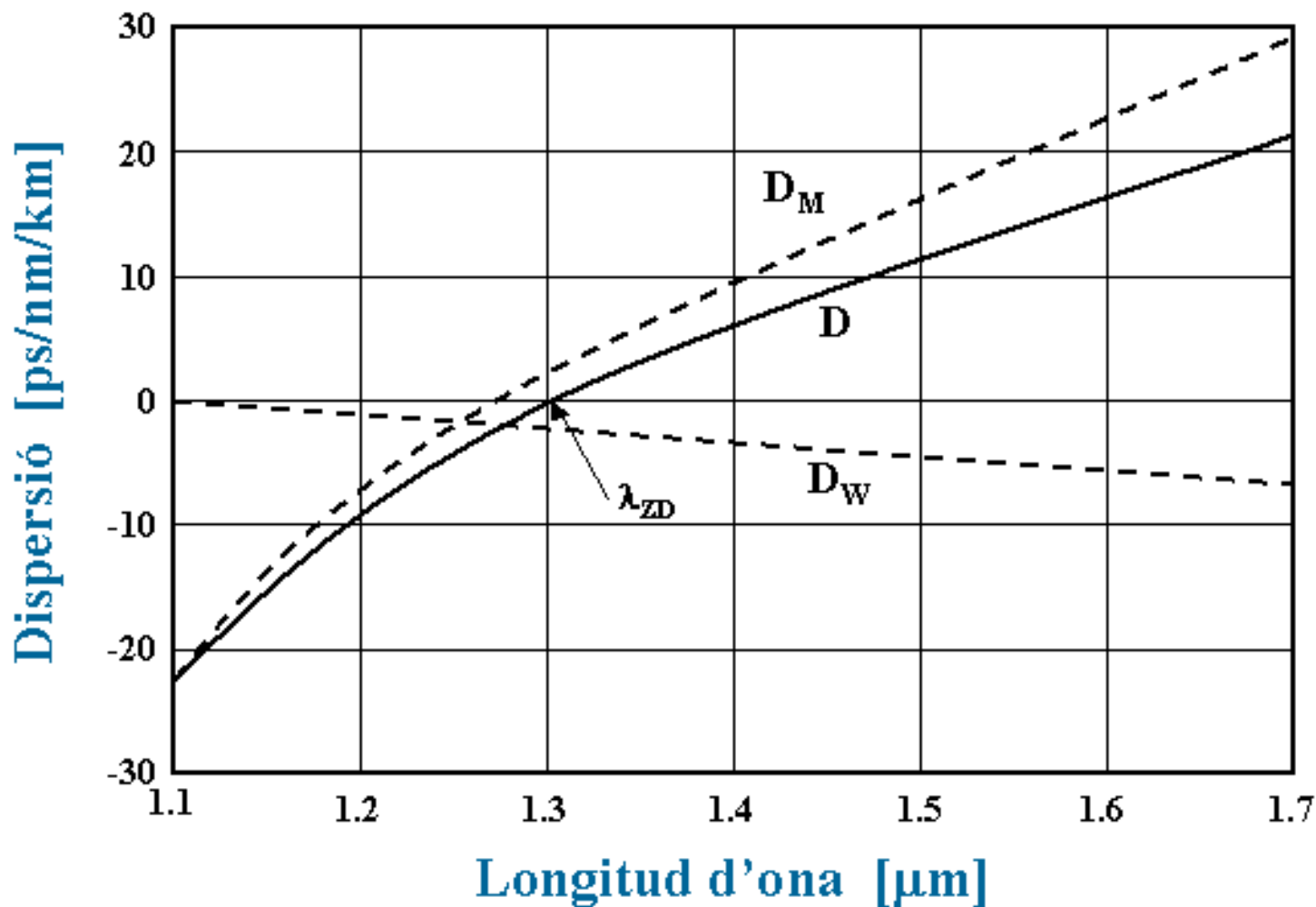
$$\mathbf{D}_W \approx -\frac{\mathbf{n}_{1g} - \mathbf{n}_{2g}}{c\lambda} \frac{1.984}{\mathbf{V}^2}$$

\mathbf{n}_{2g} : índex de grup del revestiment

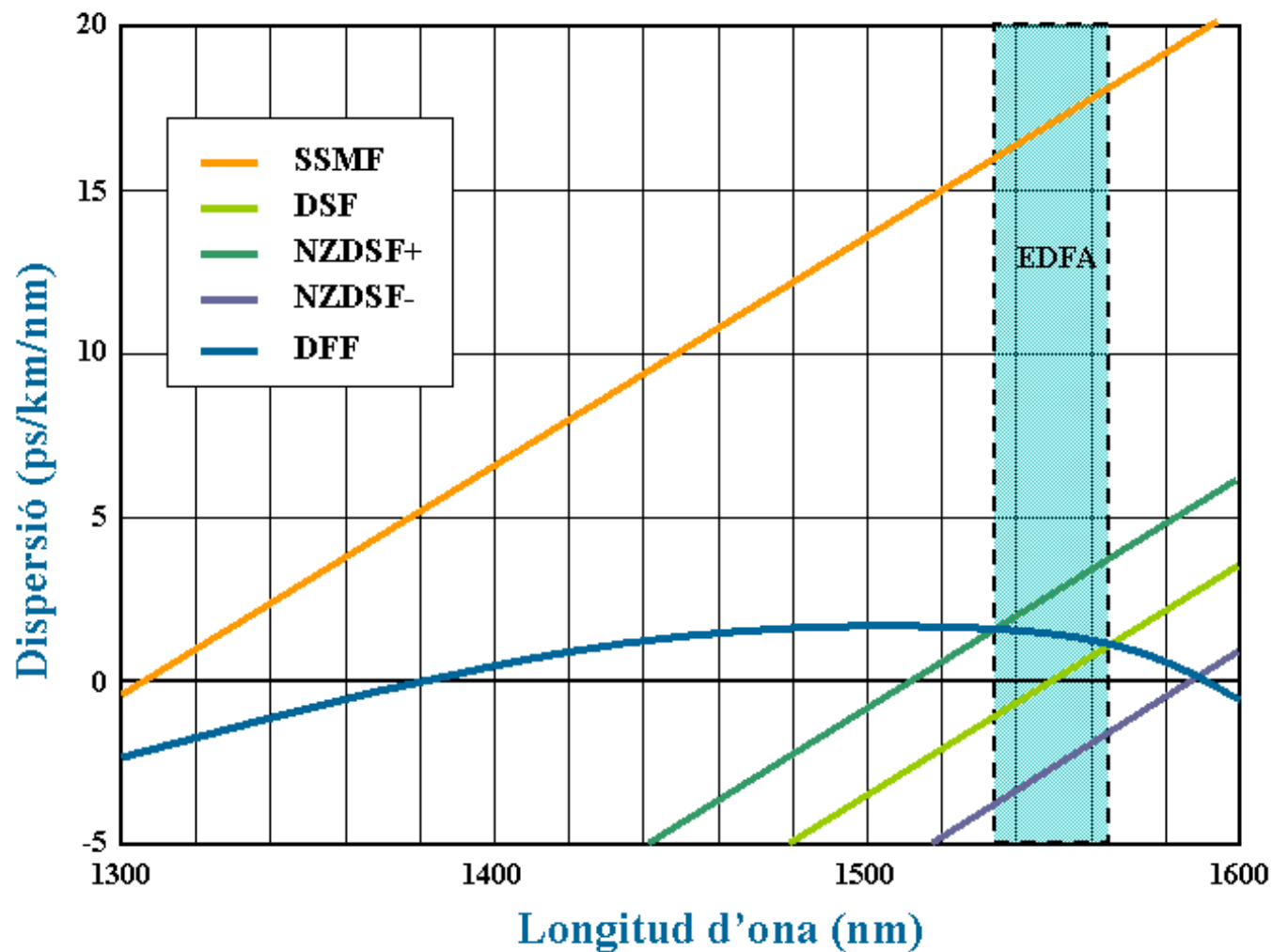
\mathbf{b} : constant propagació normalitzada

Δ : Índex de refracció relatiu
 \mathbf{V} : Freqüència normalitzada

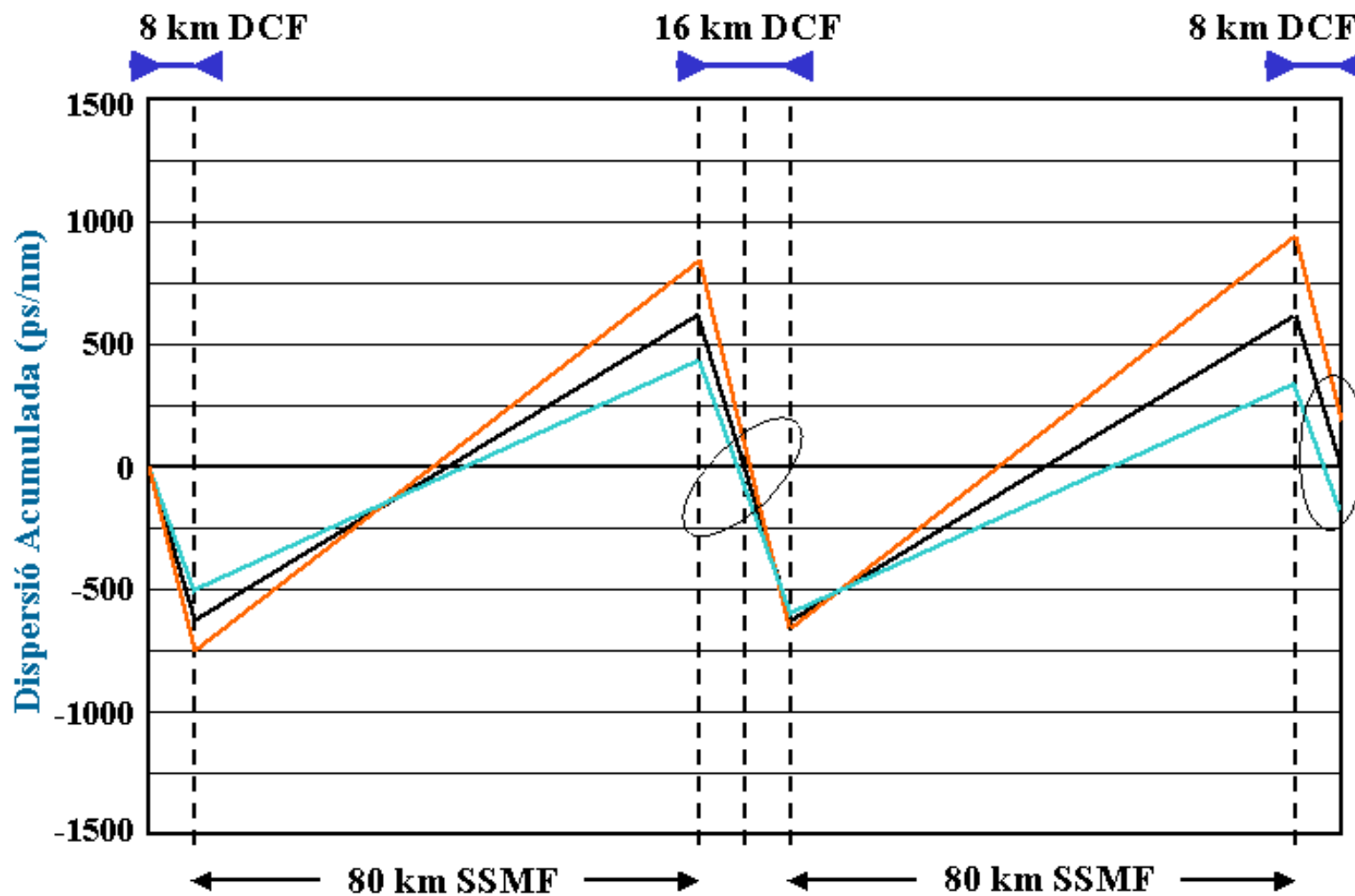
DISPERSIÓ DEL MATERIAL I GUIA-ONA COMBINADES



Característiques de dispersió de diferents fibres comercials



Compensació de dispersió amb fibres DCF (mapes de dispersió)



Compromís entre atenuació i dispersió

Transmissor

P_0 [dBm]: Potència transmesa
 λ [nm]: Longitud d'ona nominal
 $\Delta\lambda$ [nm]: Amplada espectral
 R_B [b/s]: Velocitat de bit

Fibra

α [dB/km]: Atenuació
 D [ps/nm·km]: Dispersió

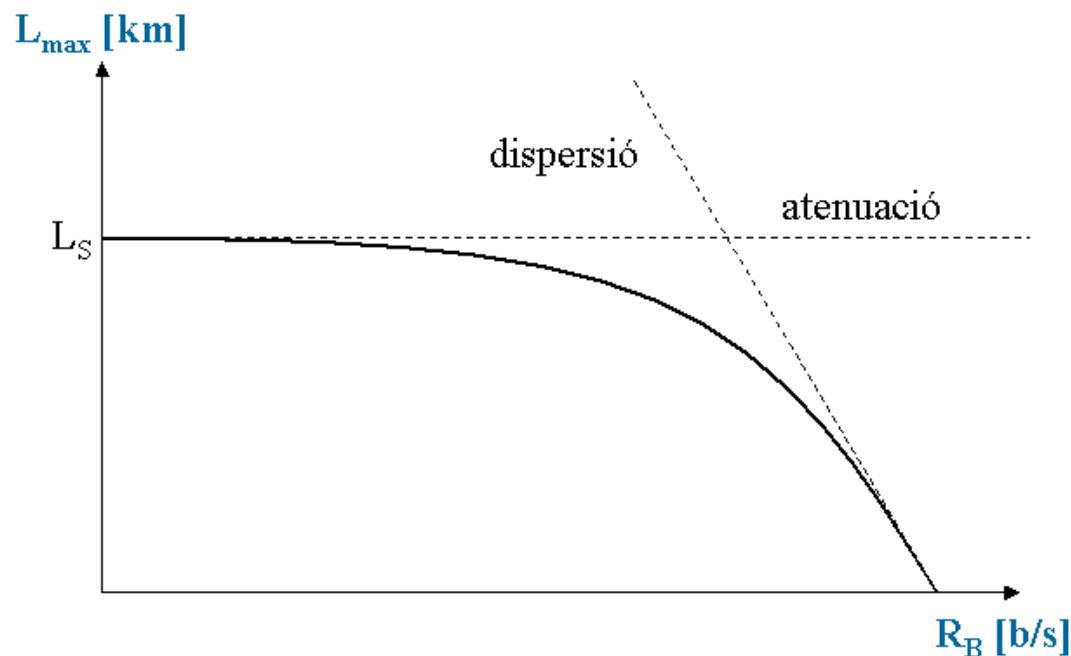
$$P_0 - \alpha L_S = S_R$$

$$\Delta T = |D| \cdot \Delta\lambda \cdot L \leq T_B = \frac{1}{R_B}$$

Receptor

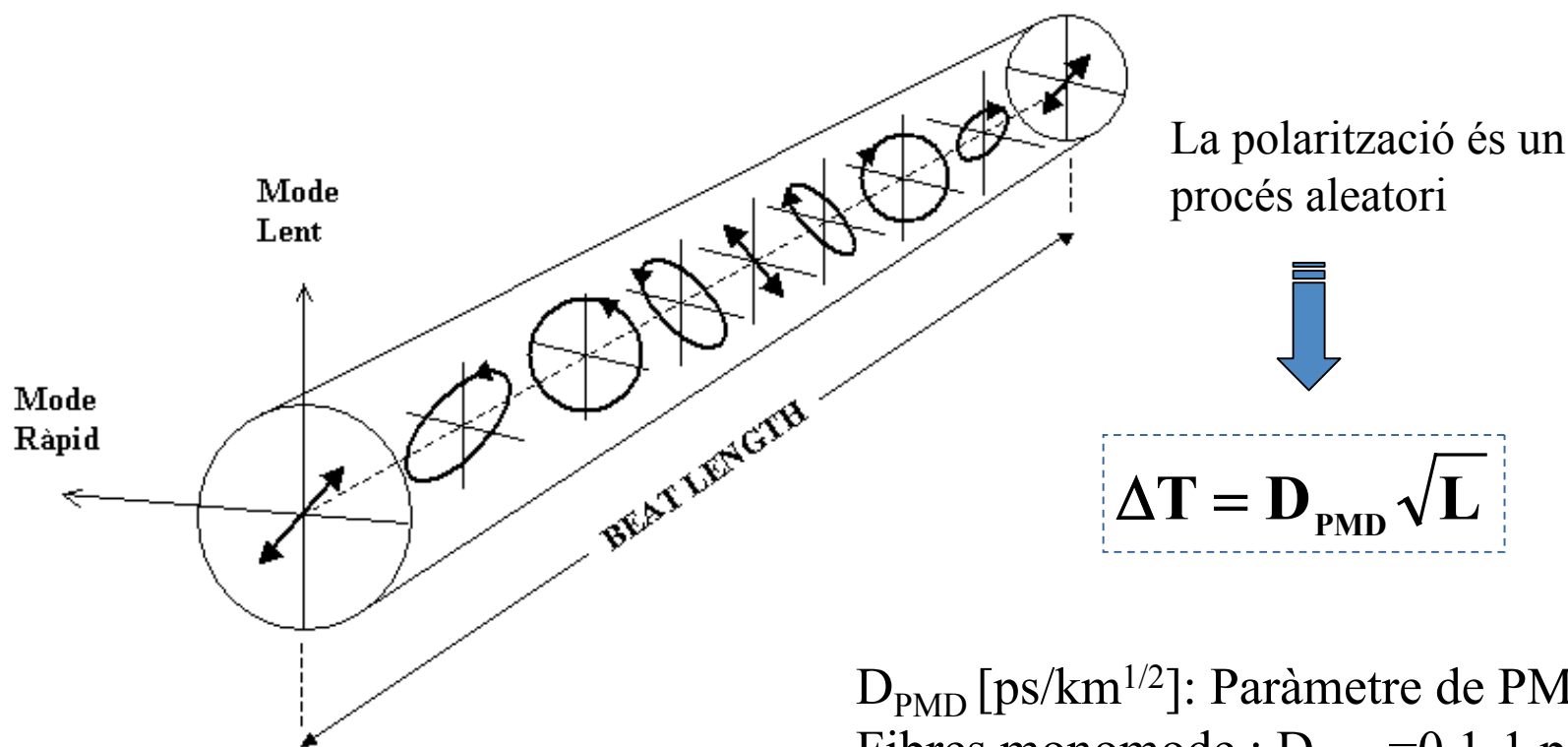
S_R [dBm]: Sensibilitat

BER=10⁻⁹



Dispersió de polarització (PMD)

L'origen d'aquest tipus de fenomen prové de la dependència de l'índex de refracció n , per tant, de la velocitat de grup, en quant a la polarització.



D_{PMD} [ps/km^{1/2}]: Paràmetre de PMD
 Fibres monomode : $D_{\text{PMD}} = 0.1-1$ ps/km^{1/2}

AMPLE DE BANDA

Definició

“L’ample de banda d’una fibra es defineix a partir de la seva resposta impulsional i és inversament proporcional a la dispersió”

$$\mathbf{B} \propto \frac{1}{\tau}$$

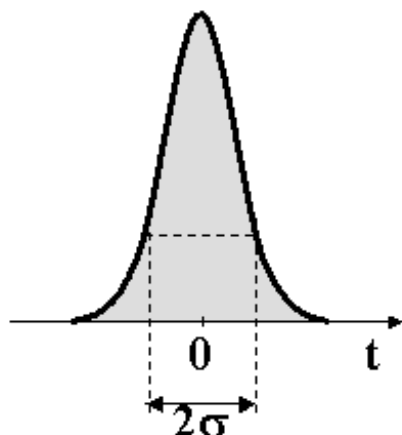
Fibres multimode \longrightarrow $\tau_T = \left[\tau_{\text{inter}}^2 + \tau_{\text{intra}}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \approx \tau_{\text{inter}}$

Fibres monomode \longrightarrow $\tau_T = \tau_{\text{intra}}$

τ_{intra} i τ_{inter} són v.a.
Independents de mitja zero

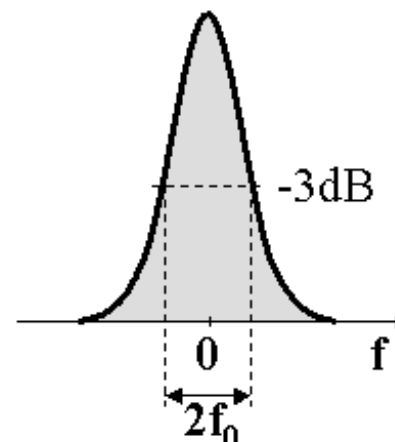
COMPORTAMENT GAUSSIÀ

Resp. Impulsional



σ : Desviació Tipus

Func. Transferència



f_0 : AB -3dB

Domini Temporal

Funció
Gaussiana

$$\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\sigma}\right)^2\right]$$

$$\tau = 2\sigma$$

Domini Freqüencial

$$\exp\left[-\ln 2\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]$$

f_0 : ample de banda per m

Funció
Gaussiana

Ample de banda

$$h(t) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\sigma}\right)^2\right] \xrightarrow{F} H(f) = \sigma\sqrt{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{f}{\frac{1}{2\pi\sigma}}\right)^2\right]$$

$$H_{-3dB}(f_0) = \frac{1}{2}H(0) \rightarrow f_0 = \frac{\sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi^2}}}{\sigma} \approx \frac{0.1874}{\sigma} \quad [\text{m/s}] \quad \longrightarrow \quad \boxed{B = \frac{f_0}{L}} \quad [1/\text{s}]$$

$$\boxed{f_0\sigma = \sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi^2}} \approx 0.1874}$$

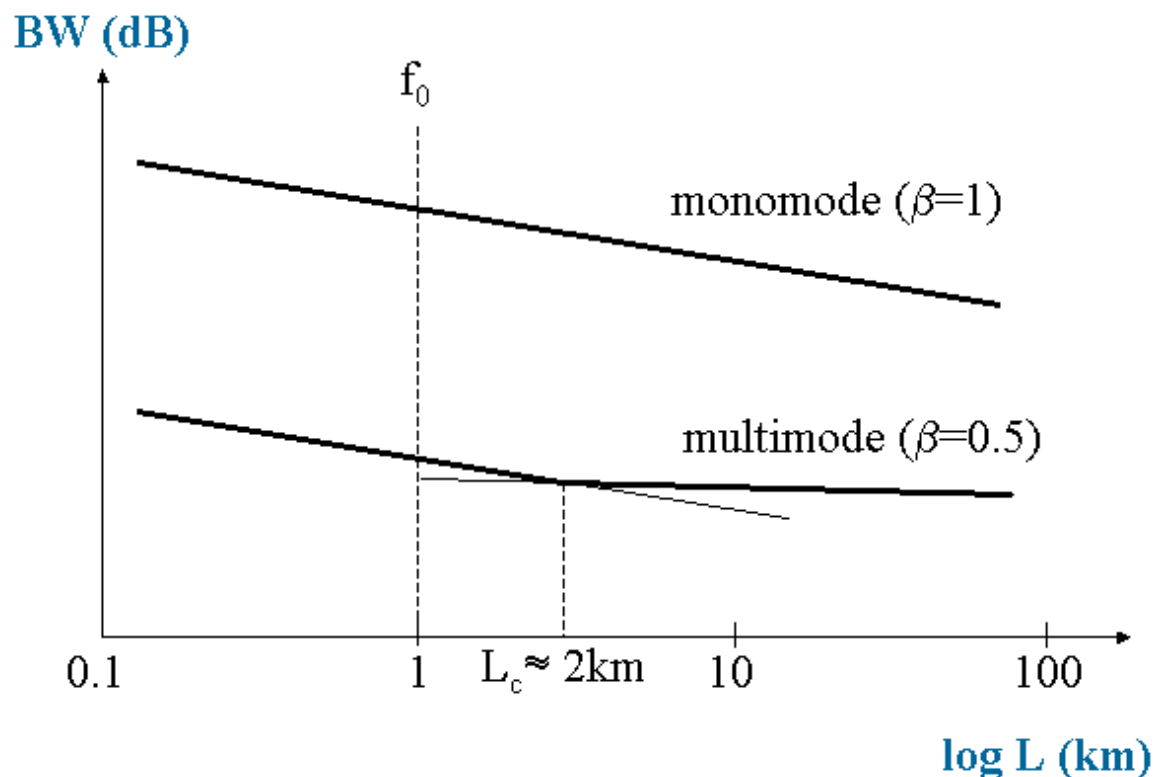
f_0 [Hz·m]: Ample de banda per m
 σ [s/m]: Desviació tipus de dispersió

$$\boxed{f_0\sigma = \sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi^2}} 10^3 \approx 187.4}$$

f_0 [GHz·km]: Ample de banda per km
 σ [ps/km]: Desviació tipus de dispersió

Ample de banda pràctic

“L’ample de banda pràctic d’una fibra es defineix a partir de la correcció del seu ample de banda teòric fent ús del paràmetre β ”



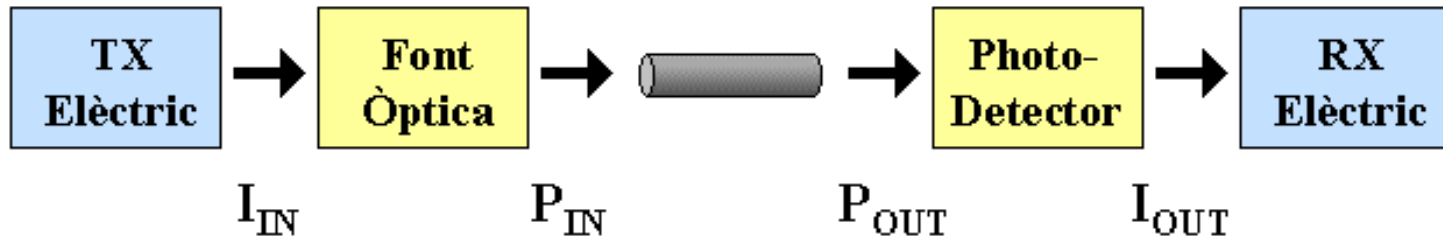
$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{f}_0}{\mathbf{L}^\beta}$$

$$0.5 < \beta < 1$$

$$\beta=0.5$$

Fibres multimode amb font LED i $L > L_c$

AMPLE DE BANDA ELÈCTRIC vs ÒPTIC

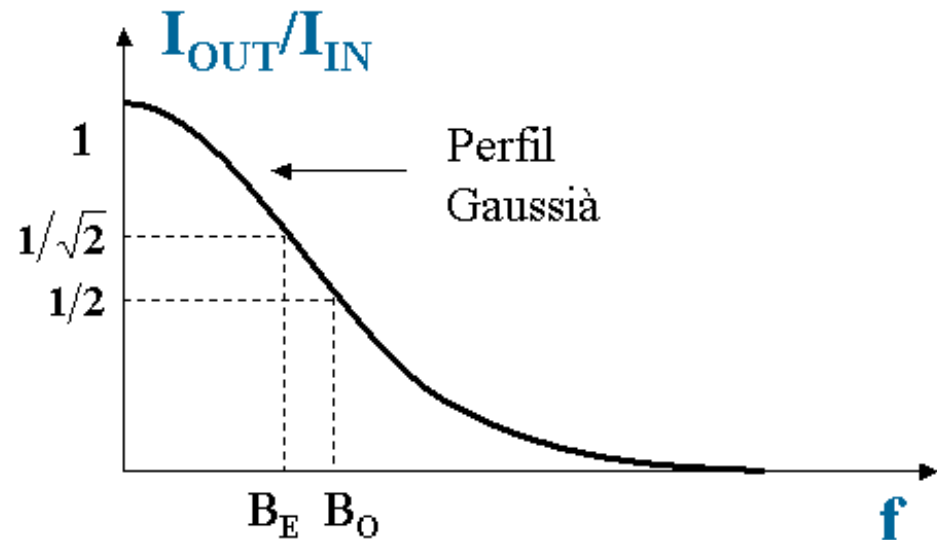


$$|H_E|^2 \equiv \frac{P_{E-IN}}{P_{E-OUT}} = \frac{I_{OUT}^2}{I_{IN}^2}$$

$$B_E \equiv f \Big|_{|H_E|^2 = \frac{1}{2}} \rightarrow \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$|H_O|^2 \equiv \frac{P_{O-IN}}{P_{O-OUT}} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}}$$

$$B_O \equiv f \Big|_{|H_O|^2 = \frac{1}{2}} \rightarrow \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{1}{2}$$



$$B_O > B_E$$

$$|H|^2 = \exp[-\alpha f^2]$$

$$B_o \rightarrow \exp[-\alpha B_o^2] = \frac{1}{2} \rightarrow \alpha_o = \frac{\ln 2}{B_o^2}$$

$$B_E \rightarrow \exp[-\alpha B_E^2] = \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow \alpha_E = \frac{\ln 2}{2B_E^2}$$



$$B_o = \sqrt{2} B_E$$

$$|H|^2 = \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{f}{B_o}\right)^2\right] = \exp\left[-\frac{\ln 2}{2} \left(\frac{f}{B_E}\right)^2\right]$$

Relació $R_B - B_E$

“El que limita la velocitat de transmissió és l’ample de banda elèctric”

$$\sigma f_o = 0.1874$$

$$f_E = \frac{f_o}{\sqrt{2}} \rightarrow \sigma f_E = 0.1325$$

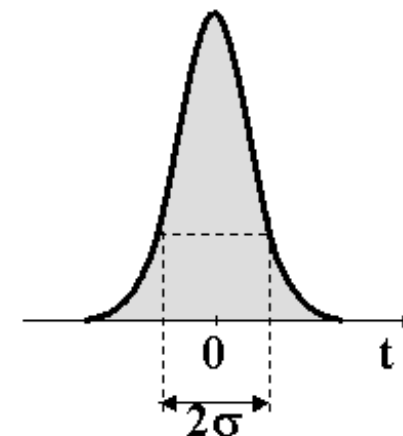
$$2\sigma = \tau$$



$$R_B \leq 2B_E$$

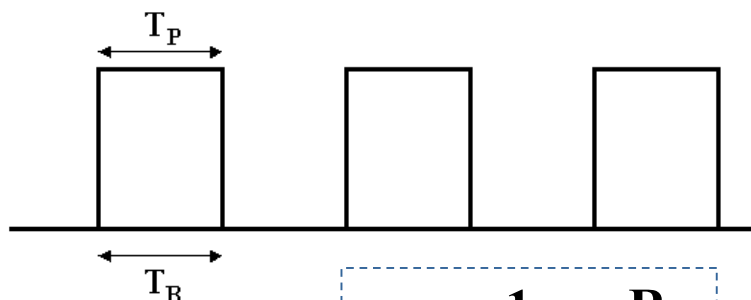
Nyquist

Resp. Impulsional



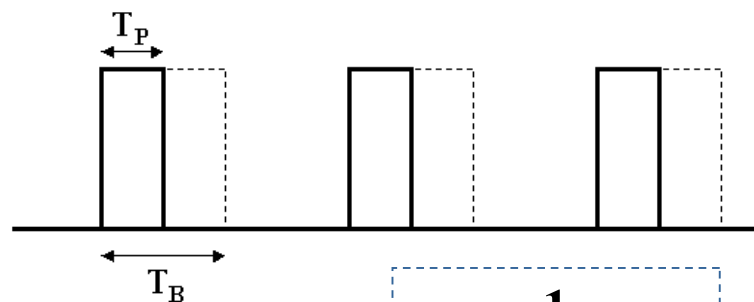
Relació $T_B - B_E$

Modulació NRZ



$$B_E = \frac{1}{2T_B} = \frac{R_B}{2}$$

Modulació RZ



$$B_E = \frac{1}{T_B} = R_B$$

Espectres de senyal

